



“双碳”目标下的潜在新型建筑保温材料——全生物质阻燃气凝胶

邓诗碧^{1*}, 赵海波²

1. 中国科学院成都文献情报中心生物科技战略研究中心, 成都 610299;

2. 四川大学环保型高分子材料国家地方联合工程实验室, 成都 610064

* 联系人, E-mail: dengsb@clas.ac.cn

A potential novel building insulation material under carbon peaking and carbon neutrality goals: Fully biomass-based aerogel with enhanced flame retardancy

Shibi Deng^{1*} & Haibo Zhao²

¹ Center for Strategic Studies on Bioscience and Biotechnology, Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

² National Engineering Laboratory of Eco-Friendly Polymeric Materials, Sichuan University, Chengdu 610064, China

* Corresponding author, E-mail: dengsb@clas.ac.cn

doi: 10.1360/TB-2022-0103

随着社会的发展日新月异, 我国的能源消耗情况日益严峻, 导致严重的资源和环境问题。据统计, 我国能源消费总量已由2000年的14.7亿吨标准煤增长至2020年的49.8亿吨标准煤^[1], 年平均增长率达到了6.3%。其中, 建筑能耗在社会整体能耗中的占比不容忽视。2018年全国建筑全过程能耗总量为21.47亿吨标准, 占全国能源消费总量比重为46.5%^[2]。国务院此前印发的《2030年前碳达峰行动方案》已明确提出, 加快更新建筑节能、市政基础设施等标准, 提高节能降碳要求。因此, 建筑节能对于降低社会整体能耗和实现“绿色低碳”的战略目标至关重要。

使用保温隔热材料是最有效的建筑节能方法之一。为房子穿上“保温服”, 在冬季可以防止室内热量散失, 在夏季可以隔绝室外热气, 明显改善室内热环境。以聚氨酯(PU)泡沫、聚苯乙烯(EPS)泡沫为主的石油基泡沫材料密度低、导热率低, 且生产工艺成熟、成本低廉, 是现阶段最常用的建筑保温材料。然而, 这类材料高度易燃, 近年来由其引发的火灾屡见不鲜, 例如英国“6·14”伦敦公寓楼火灾事故、上海“11·15”重大火灾事故等, 造成了重大人员伤亡和恶劣的社会影响。此外, 石油基泡沫材料的来源不可再生, 其废弃物造成的环境污染也一直是全世界普遍关注的社会问题。而“双碳”目标的实现迫切需要我们探索具有可再生来源的环保、防

火安全新型建筑保温材料。

生物质来源广泛、环境友好, 且具有可再生性与“固碳”性, 近年来备受青睐。气凝胶是近年来新兴的一类“超级”隔热材料, 是已知最轻的固体材料之一, 具有低导热系数和高孔隙率等特征^[3], 被认为是传统石油基泡沫保温材料的理想替代者。结合两者优势, 生物质气凝胶满足了新时期建筑保温材料对可持续发展和低导热的要求。但生物质气凝胶仍存在易燃问题, 为避免建筑火灾的发生, 需加入有机或无机阻燃剂对其进行改性^[4], 但此举会在一定程度上破坏材料原有的隔热和力学性能。并且, 若所使用的阻燃剂并非生物质来源, 也会为后续环境中的降解埋下隐患。因此, 有研究团队选择了一种不会破坏材料本身性能的生物质来源化合物——植酸(phytic acid, PA)作为阻燃剂, 发明了高性能难燃全生物质气凝胶^[5,6]。PA是一种广泛存在于植物种子、茎中的有机酸, 含有大量的磷元素, 是一种可替代传统阻燃剂的环保型阻燃剂; 由于含有大量磷酸根基团与羟基, PA可与其他物质的羧基、氨基等基团发生强氢键作用, 从而形成稳定的交联结构, 提升材料的力学性能。此外, 研究人员选择了来源广泛、绿色无污染的天然产物——海藻酸铵(ammonium alginate, AL)作为气凝胶的生物质基材。AL是一种海洋藻类来源的盐, 分子结构含大量羟基, 可与PA分子通过氢键作用形成

稳定的交联网络。

如图1所示, 研究人员首先通过物理混合获得相应水凝胶, 进而采用环境友好的冷冻干燥法处理水凝胶, 制备出了海藻酸铵/植酸气凝胶(AL/PA)。这种全生物质气凝胶作为建筑保温材料性能优越。50 kg的成年人站在这种轻巧的气凝胶上, 厚度为10.30 mm的气凝胶仅被压扁了0.27 mm, 表明这种气凝胶具有较高的抗压缩性及韧性。将EPS泡沫、PU泡沫和AL/PA同时平铺于150°C的热板上, 在加热30 min后, EPS泡沫表面升温至69.6°C, 且发生部分收缩, PU泡沫表面温度升至48.6°C, 而AL/PA则表现出最好的隔热能力, 表面温度为47.4°C, 可见它将大部分热量阻挡在了底部。

如前文所述, 建筑保温材料的防火安全是目前亟待解决的迫切需求。研究人员对AL/PA进行了经典的阻燃性能测试。实验数据显示, 纯AL气凝胶高度易燃, 极限氧指数(LOI, 指在规定的条件下, 材料在氧氮混合气流中进行有焰燃烧所需的最低氧浓度, 数值高表示材料不易燃烧, 反之则易燃)为18.5%, 而AL/PA的LOI值高达57.4%, 显现出较好的不燃性; 纯AL气凝胶未能通过UL-94垂直直燃测试(UL-94垂直直燃测试以两次程序化点火流程模拟小火燃烧场景, 根据样品在垂直状态下的燃烧时间、燃烧长度、燃烧颗粒或滴落物情况对样品进行阻燃等级评定, 阻燃性能从V-0、V-1、V-2到无

等级依次降低), 而AL/PA达到较高的V-0阻燃等级。最后, 研究人员还通过锥形量热法来模拟真实规模火灾。实验数据显示, 纯AL气凝胶在高温热辐射下需要37 s被点燃, 而AL/PA的点火时间随着PA的引入得到了大幅延长, 可达到81 s。AL/PA的热释放的峰值也比纯AL气凝胶降低了57%以上, 达到热释放峰值的时间也由45 s延长到115 s以上。一旦发生火灾, 能为受困人员延长宝贵的逃生窗口期。AL/PA的总烟释放量以及烟释放速率都大幅降低, 避免人员窒息或吸入有毒气体而亡。可见, 作为富磷生物质的PA显著增强了气凝胶的阻燃性, 还赋予了材料较好的抑烟效果。最后通过堆肥实验证明, 这种全生物质气凝胶具有高达91.43%的生物降解率, 有效减少了废弃建材的二次污染风险, 为环境安全做出贡献。

我国的生物质资源丰富, 分布广泛, 开发潜力巨大。在当前低碳经济的浪潮中, 生物质能作为可替代化石能源的清洁能源, 受到了更多的关注。另外, 多种新型生物质材料的开发和应用也逐渐进入人们的视野, 全生物质气凝胶正处于大有可为的重要应用机遇期^[7]。目前, 已有很多产业界和学术界的科研人员就生物质气凝胶材料开展研究, 力图实现传统保温材料的革命性升级替代, 以期助力“双碳”目标的实现。此外, 在能源危机下, 全生物质气凝胶可用于转化和储存清洁能源; 在电磁污染治理和磁屏蔽的需求导向下, 全生物质气凝胶也显现

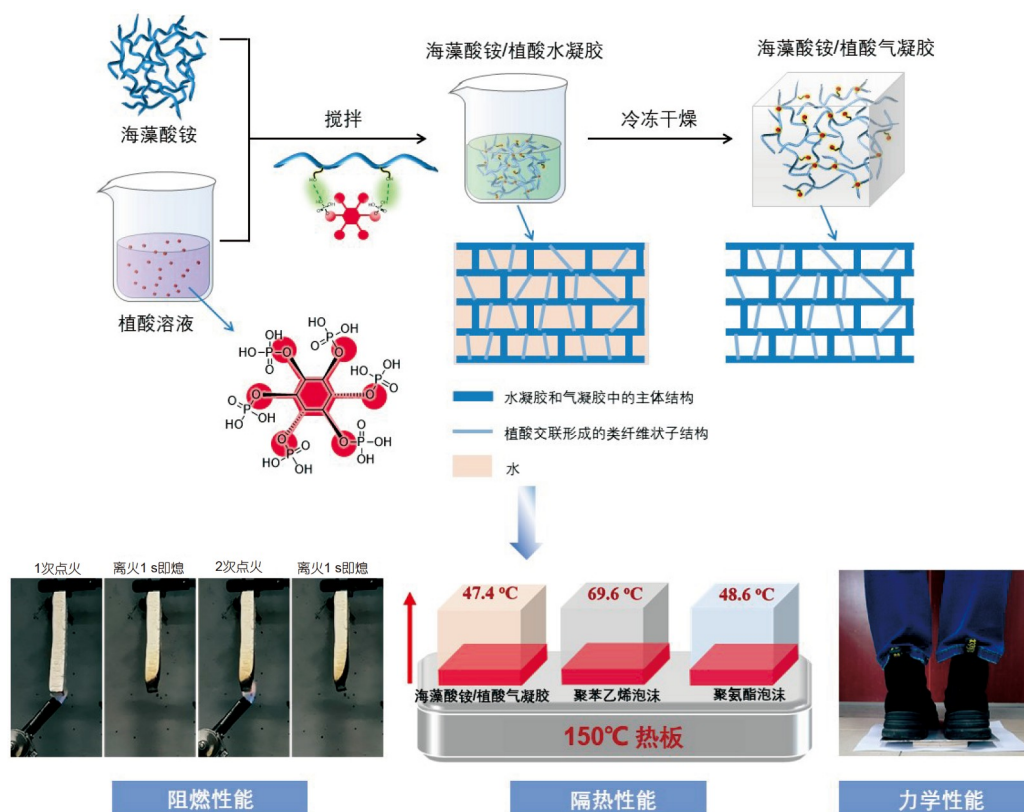


图1 (网络版彩色)海藻酸铵/植酸气凝胶的制备过程及其各项性能^[6]. Copyright © 2021, Elsevier

Figure 1 (Color online) The preparation process of AL/PA aerogel and its properties characterization^[6]. Copyright © 2021, Elsevier

出较好的应用潜力。在全生物质气凝胶的设计和制备工艺不断升级的未来,生物质原料成本和气凝胶制备工艺成本将逐

渐降低,更加符合日益紧迫的可持续发展要求,有望在应对世界人口、能源危机等全球问题中发挥重要作用。

推荐阅读文献

- 1 National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2021 (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2021 [国家统计局. 中国统计年鉴 2021年. 北京: 中国统计出版社, 2021]
- 2 China Association of Building Energy Efficiency Energy Consumption Statistics Committee. China Building Energy Consumption Annual Report 2020 (in Chinese). Xiamen: China Association of Building Energy Efficiency, 2020 [中国建筑节能协会能耗统计专委会. 中国建筑能耗研究报告(2020). 厦门: 中国建筑节能协会, 2020]
- 3 Wang Y Z, Chen L. Novel flame retardant materials (in Chinese). J New Industrialization, 2016, 6: 38–61 [王玉忠, 陈力. 新型阻燃材料. 新型工业化, 2016, 6: 38–61]
- 4 Liu B W, Zhao H B, Wang Y Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials. *Adv Mater*, 2021, 34: 2107905
- 5 Wang H, Liu J X, Li M N, et al. Fully biobased aerogels with high strength and flameretardancy (in Chinese). Chem Res Appl, 2019, 31: 1335–1341 [王涵, 刘晋旭, 李蒙恩, 等. 难燃生物质气凝胶的设计制备与性能研究. 化学研究与应用, 2019, 31: 1335–1341]
- 6 Cao M, Liu B W, Zhang L, et al. Fully biomass-based aerogels with ultrahigh mechanical modulus, enhanced flame retardancy, and great thermal insulation applications. *Compos Part B-Eng*, 2021, 225: 109309
- 7 Wei G, Zhang J, Usulli M, et al. Biomass vs inorganic and plastic-based aerogels: Structural design, functional tailoring, resource-efficient applications and sustainability analysis. *Prog Mater Sci*, 2021, 125: 100915